# Etude de l'attenuation de rayons X en fonction du meteriau et de l'épaisseur de l'absorbeur

### Objectifs expérimentaux

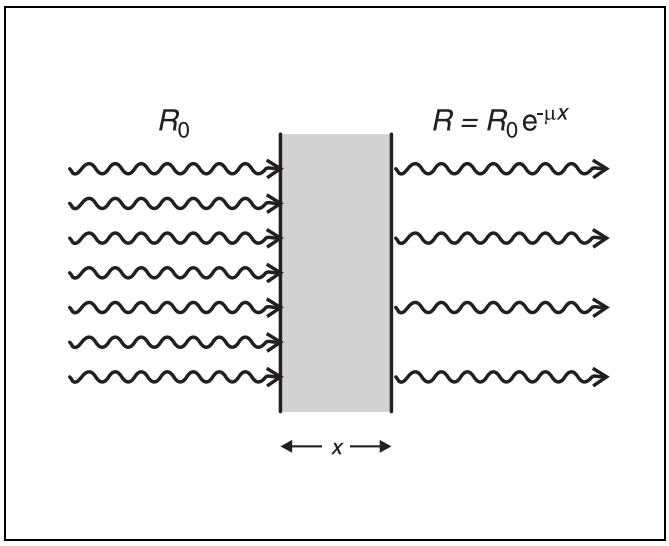
- Etude de l'atténuation du rayonnement X en fonction de l'épaisseur de l'absorbeur.
- Vérification de la loi d'atténuation de Lambert.
- Etude de l'atténuation du rayonnement X en fonction du matériau de l'absorbeur.
- Mise en évidence de la longueur d'onde de l'atténuation.

## Notions de base

On entend par atténuation du rayonnement X la baisse d'intensité lors du passage des rayons à travers la matière. Les effets qui contribuent à l'atténuation sont au nombre de deux: la diffusion et l'absorption.

Bien que l'absorption et l'atténuation soient des phénomènes physiques différents, on caractérise souvent le matériau irradié d'absorbeur alors que d'un point de vue linguistique, le terme qui conviendrait le mieux est atténuateur. Cela prête certes à équivoque, mais compte tenu de l'usage en vigueur, nous aurons aussi en partie recours dans cette fiche d'expérience à l'appellation absorbeur à la place de l'appellation atténuateur.

La diffusion des quanta de rayonnement X sur les atomes du matériau atténuateur occasionne un changement de direction d'une partie du rayonnement. C'est ainsi que l'intensité dans la direction originale s'affaiblit. La diffusion peut être élastique ou bien liée à une perte d'énergie ou à un décalage de la longueur d'onde, c.-à-d. se manifester sous la forme d'une diffusion inélastique.




Par absorption, toute l'énergie des quanta de rayonnement X est transférée sous forme d'énergie d'excitation ou d'ionisation aux atomes ou molécules de la substance irradiée.

Si $R_0$ est le taux de comptage initial devant l'atténuateur et $R$ le taux de comptage derrière l'atténuateur, on calcule alors comme suit la transmission pour la caractérisation de la perméabilité d'un atténuateur pour le rayonnement

$$T = \frac{R}{R_0} \qquad \text{(I)}.$$

Plus la transmission d'un atténuateur est grande, plus son pouvoir d'atténuation est faible.

La transmission dépend de l'épaisseur de l'atténuateur. En supposant que les propriétés du rayonnement incident restent inchangées malgré l'atténuation, une augmentation de l'épaisseur $x$ de la faible valeur d$x$ occasionne une réduction de la transmission $T$ de la faible valeur d$T$. La baisse relative de la transmission est proportionnelle à l'augmentation absolue de l'épaisseur:

$$-\frac{\mathrm{d}T}{T} = \mu \cdot \mathrm{d}x \qquad \text{(II)}.$$

Le facteur de proportionnalité $\mu$ est qualifié de coefficient d'atténuation linéaire.

Comme pour $x = 0$, on a la transmission $T = 1$, l'intégration de l'équation (II) donne

$$T = \mathrm{e}^{-\mu \cdot x} \qquad \text{(III)}$$

ou

$$\ln T = -\mu \cdot x \qquad \text{(IV)}.$$

Cette relation est la loi d'atténuation de Lambert, du nom de *Johann Heinrich Lambert* actif au 18$^{\text{ème}}$ siècle en sa qualité de scientifique et de philosophe.

Le but de l'expérience est de vérifier la loi de Lambert. Du reste, on montrera que l'atténuation dépend du matériau de l'atténuateur et de la longueur d'onde du rayonnement X.

## Matériel

| | |
|---|---|
| 1 appareil à rayons X | 554 811 |
| ou | |
| 1 appareil à rayons X | 554 812 |
| 1 goniomètre | 554 83 |
| 1 tube compteur à fenêtre pour rayonnements $\alpha$, $\beta$, $\gamma$ et X | 559 01 |
| 1 Supplément absorption X-ray | 554 834 |

## Montage

Le montage est représenté sur la fig. 1.

- Installer le collimateur dans le logement du collimateur **(a)** (faire attention à la rainure de guidage).
- Fixer le goniomètre sur les barres de guidage **(d)** et enficher le câble plat **(c)** pour la commande du goniomètre.
- Enlever le capuchon protecteur du tube compteur à fenêtre, placer le tube compteur à fenêtre dans le logement du capteur **(e)** et brancher le câble du tube compteur dans la partie expérimentation à la douille GM tube.
- Démonter le porte-cible **(g)** du goniomètre et enlever le plateau pour cible du porte-cible.
- Introduire le côté à insérer du jeu d'absorbeurs I **(f)** dans la rainure en quart de cercle du porte-cible et l'insérer prudemment jusqu'à la butée du porte-cible.

## Conseils de sécurité

L'appareil à rayons X respecte les consignes relatives à la construction d'un appareillage à rayons X pour l'enseignement et d'un appareil à protection totale et est homologué en tant que tel (d'après le règlement allemand sur les rayonnements X).

Grâce aux mesures de protection et de blindage incorporées par le constructeur, le taux de dose hors de l'appareil est réduit à moins de 1 $\mu$Sv/h, une valeur d'un ordre de grandeur correspondant à la dose d'irradiation naturelle.

- Avant la mise en service, s'assurer du bon état de l'appareil à rayons X et vérifier que la haute tension est bien coupée à l'ouverture des portes coulissantes (voir mode d'emploi de l'appareil à rayons X).
- Tenir l'appareil à rayons X à l'abri des personnes non autorisées.

Eviter une surchauffe de l'anode dans le tube à rayons X Mo.

- A la mise en marche de l'appareil à rayons X, vérifier si le ventilateur dans la partie tube fonctionne.

Le goniomètre s'ajuste exclusivement par le biais de moteurs pas à pas électriques.

- Ne pas bloquer le bras de cible et le bras de capteur du goniomètre et ne pas modifier le réglage par force.

- Monter le porte-cible.
- Amener la cible et le capteur aux positions zéro avec le bouton-poussoir Zero.
- Vérifier la position zéro du diaphragme sans absorbeur dans le jeu d'absorbeurs ainsi que celle du capteur et les corriger si nécessaire (voir «Ajustage de la position zéro du système de mesure» dans le mode d'emploi de l'appareil à rayons X).
- En déplaçant le goniomètre, régler la distance entre le collimateur de l'appareil à rayons X et le diaphragme sans absorbeur à env. 5 cm et en déplaçant le porte-capteur **(b)**, régler la distance entre le diaphragme sans absorbeur et la fente du capteur elle aussi sur env. 5 cm.

## Réalisation

**a) Influence de l'épaisseur de l'absorbeur sur l'atténuation:**

*a1) sans filtre en zircon:*

- Régler la haute tension du tube $U$ = 21 kV.
- Régler le courant d'émission $I$ = 0,05 mA.

*N.B.: Le taux de comptage ne devrait, si possible, guère dépasser 1500 /s. Cela évite une éventuelle correction du temps mort.*

- Appuyer sur le bouton-poussoir Target.
- Régler le pas angulaire $\Delta\beta = 0°$ (voir «Activation du mode de service Photominuterie» dans le mode d'emploi de l'appareil à rayons X).
- Régler un temps de mesure $\Delta t$ = 100 s.
- Avec le bouton de réglage Adjust, procéder successivement à l'ajustage des positions angulaires de l'absorbeur (env. 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50° et 60°), lancer la mesure avec le bouton-poussoir Scan et appeler le taux de comptage $R$ moyen après l'écoulement du temps de mesure avec le bouton-poussoir Replay. Etablir un protocole des résultats (voir tab. 1).

*a2) avec filtre en zircon:*

- Monter le filtre en zircon sur le collimateur (la composante à onde courte du rayonnement de freinage généré pour $U$ = 21 kV est alors quasiment supprimée).
- Régler le courant d'émission $I$ = 0,15 mA et le temps de mesure $\Delta t$ = 200 s.
- Avec le bouton de réglage Adjust, procéder successivement à l'ajustage des positions angulaires de l'absorbeur (env. 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50° et 60°), lancer la mesure avec le bouton-poussoir Scan et appeler le taux de comptage $R$ moyen après l'écoulement du temps de mesure avec le bouton-poussoir Replay. Etablir un protocole des résultats (voir tab. 2).

**b) Influence du matériau de l'absorbeur sur l'atténuation:**

*b1) sans filtre en zircon:*

- Remplacer le jeu d'absorbeurs I (absorbeurs d'épaisseur différente) par le jeu d'absorbeurs II (absorbeurs de matériau différent, $d$ = 0,05 cm).
- Enlever le filtre en zircon.
- Régler une haute tension du tube $U$ = 30 kV (cela garantit ainsi l'irradiation des atténuateurs, aussi puissants soient-ils).
- Réglez le courant d'émission $I$ = 0,02 mA et le temps de mesure $\Delta t$ = 30 s.

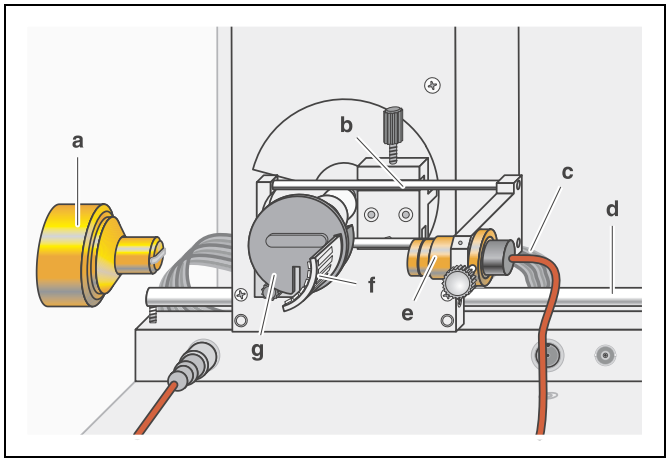



Fig. 1 Montage expérimental pour l'étude de l'atténuation du rayonnement X en fonction du matériau de l'absorbeur ou de son épaisseur

– Avec le bouton de réglage Adjust, procéder successivement à l'ajustage des positions angulaires des trois premiers absorbeurs (env. 0°, 10° et 20°), lancer la mesure avec le bouton-poussoir Scan et appeler le taux de comptage $R$ moyen après l'écoulement du temps de mesure avec le bouton-poussoir Replay. Etablir un protocole des résultats
– Régler un courant d'émission $I$ = 1,00 mA et un temps de mesure $\Delta t$ = 300 s.
– Avec le bouton de réglage Adjust, procéder successivement à l'ajustage des positions angulaires des quatre absorbeurs restants (env. 30°, 40°, 50° et 60°), lancer la mesure avec le bouton-poussoir Scan et appeler le taux de comptage $R$ moyen après l'écoulement du temps de mesure avec le bouton-poussoir Replay. Etablir un protocole des résultats (voir tab. 3).

*b2) avec filtre en zircon:*

– Monter le filtre en zircon et répéter les mesures comme pour b1) (voir tab. 4).

*b3) Mesure du rayonnement ambiant:*

– Régler les paramètres $U$ = 0 kV et $I$ = 0 mA et mesurer le taux de comptage $R_1$ du rayonnement ambiant avec le temps de mesure $\Delta t$ = 300 s.

## Exemple de mesure

**a) Influence de l'épaisseur de l'absorbeur sur l'atténuation:**

Tab. 1: Taux de comptage $R$ en fonction de l'épaisseur $d$ de l'absorbeur en aluminium ($U$ = 21 kV, $I$ = 0,05 mA, $\Delta t$ = 100 s, sans filtre en zircon)

| | $\frac{R}{s^{-1}}$ |
|---|---|
| 0 | 977,9 |
| 0,5 | 428,6 |
| 1,0 | 210,1 |
| 1,5 | 106,1 |
| 2,0 | 49,10 |
| 2,5 | 30,55 |
| 3,0 | 16,11 |

Tab. 2: Taux de comptage $R$ en fonction de l'épaisseur $d$ de l'absorbeur en aluminium ($U$ = 21 kV, $I$ = 0,15 mA, $\Delta t$ = 200 s, avec filtre en zircon)

| $\frac{d}{mm}$ | $\frac{R}{s^{-1}}$ |
|---|---|
| 0 | 969,4 |
| 0,5 | 426,1 |
| 1,0 | 197,3 |
| 1,5 | 84,29 |
| 2,0 | 40,51 |
| 2,5 | 19,48 |
| 3,0 | 9,52 |

**b) Influence du matériau de l'absorbeur sur l'atténuation:**

Tab. 3: Taux de comptage $R$ en fonction du matériau de l'absorbeur ($U$ = 30 kV, $d$ = 0,05 cm, sans filtre en zircon)

| Absorbeur | $Z$ | $\frac{I}{mA}$ | $\frac{\Delta t}{s}$ | $\frac{R}{s^{-1}}$ |
|---|---|---|---|---|
| vide | | 0,02 | 30 | 1841 |
| C | 6 | 0,02 | 30 | 1801 |
| Al | 13 | 0,02 | 30 | 1164 |
| Fe | 26 | 1,00 | 300 | 93,3 |
| Cu | 29 | 1,00 | 300 | 16,63 |
| Zr | 40 | 1,00 | 300 | 194,3 |
| Ag | 47 | 1,00 | 300 | 106 |

Tab. 4: Taux de comptage $R$ en fonction du matériau de l'absorbeur ($U$ = 30 kV, $d$ = 0,05 cm, avec filtre en zircon)

| Absorbeur | $Z$ | $\frac{I}{mA}$ | $\frac{\Delta t}{s}$ | $\frac{R}{s^{-1}}$ |
|---|---|---|---|---|
| vide | | 0,02 | 30 | 718,3 |
| C | 6 | 0,02 | 30 | 698,4 |
| Al | 13 | 0,02 | 30 | 406,1 |
| Fe | 26 | 1,00 | 300 | 29,24 |
| Cu | 29 | 1,00 | 300 | 6,016 |
| Zr | 40 | 1,00 | 300 | 113,9 |
| Ag | 47 | 1,00 | 300 | 24,52 |

Rayonnement ambiant: $R_1$ = 0,243 $s^{-1}$

## Exploitation et résultat

**a) Influence de l'épaisseur de l'absorbeur sur l'atténuation:**

On obtient la transmission *T* à partir des données de mesure des tableaux 1 et 2, d'après l'équation (I). Sa subordination à l'épaisseur *d* de l'absorbeur est représentée sur la fig. 2. La courbe tracée restitue l'allure exponentielle donnée par l'équation (III).

La fig. 3 donne une représentation semi-logarithmique selon l'équation (IV). Dans cette représentation, l'atténuation du rayonnement monochromatisé (avec le filtre en zircon) se décrit très bien par une droite passant par l'origine dont la pente correspond au coefficient d'atténuation linéaire $\mu$ = 15,7 $cm^{-1}$.

Pour le rayonnement X non monochromatique (non filtré), on obtient la valeur légèrement plus petite $\mu$ = 14,2 $cm^{-1}$ d'après la pente de la droite passant par l'origine adaptée conformément à l'équation (IV) pour le coefficient d'atténuation linéaire. Du reste, des écarts de l'allure linéaire se manifestent. L'atténuation ne se décrit pas à l'aide d'un seul coefficient d'atténuation; le rayonnement reçoit en effet par rapport à la mesure avec le filtre en zircon une composante plus forte en énergie qui est moins atténuée pour la même épaisseur de l'absorbeur.

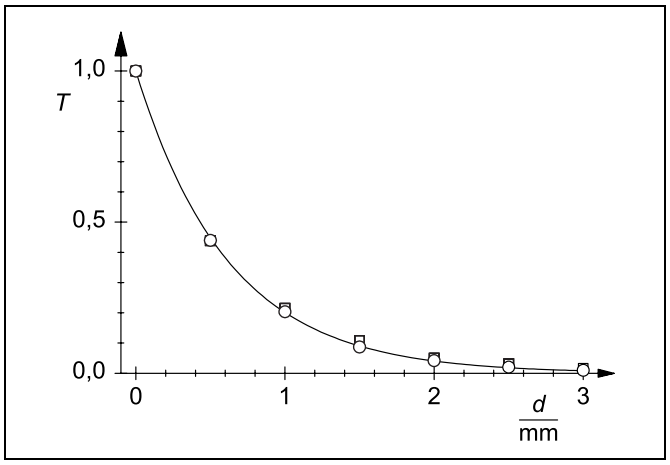



Fig. 2 Transmission *T* en fonction de l'épaisseur *d* de l'absorbeur en aluminium
Cercles: Mesure avec filtre en zircon
Carrés: Mesure sans filtre en zircon

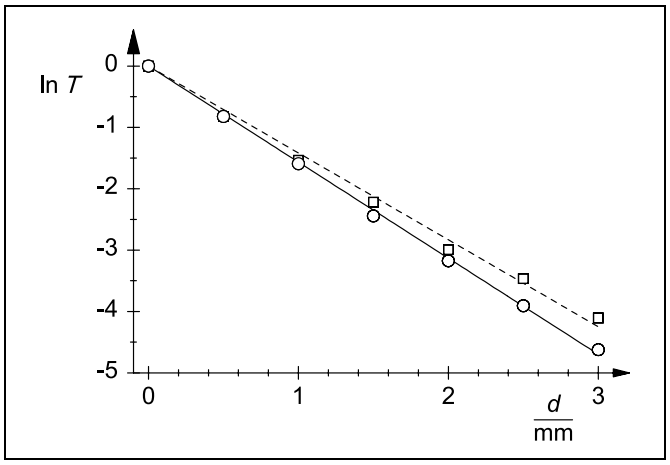



Fig. 3 Représentation semi-logarithmique de la transmission *T* en fonction de l'épaisseur *d* de l'absorbeur en aluminium
Cercles: Mesure avec filtre en zircon
Carrés: Mesure sans filtre en zircon

**b) Influence du matériau de l'absorbeur sur l'atténuation**

En supposant que le taux de comptage soit proportionnel au courant d'émission *I,* les taux de comptage issus des tableaux 3 et 4 (une fois le rayonnement ambiant déduit) peuvent être cadrés sur le courant d'émission *I* = 1,00 mA.

D'après les données modifiées, on obtient selon (I) la transmission *T* (voir tableaux 5 et 6) et à partir de la valeur obtenue, le coefficient d'atténuation linéaire $\mu$ conformément à (IV) pour *d* = 0,05 cm.

La subordination du coefficient d'atténuation $\mu$ au numéro atomique *Z* est représentée sur la fig. 4. En dessous de Z = 40 (Zr), le coefficient d'atténuation augmente considérablement avec le numéro atomique. Au passage à *Z* = 40, une baisse soudaine plus accentuée pour le rayonnement filtré se manifeste. La baisse résulte du fait que certaines excitations pour Zr ne sont plus possibles (énergie de liaison de la couche K trop grande, voir expérience P6.3.4.5). Le rayonnement non filtré comprend une composante en énergie plus forte capable de fournir cette excitation et la réduction de $\mu$ est ainsi plus faible.

Tab. 5: Taux de comptage *R* (*I* = 1,00 mA), transmission *T* et coefficient d'atténuation linéaire $\mu$ en fonction du numéro atomique *Z* du matériau de l'absorbeur (*U* = 30 kV, *d* = 0,05 cm, sans filtre en zircon)

| *Z* | $\frac{R}{s^{-1}}$ | *T* | $\frac{\mu}{cm^{-1}}$ |
|---|---|---|---|
| vide | $92{,}0 \cdot 10^3$ | 1,000 | 0 |
| 6 | $90{,}0 \cdot 10^3$ | 0,978 | 0,445 |
| 13 | $58{,}3 \cdot 10^3$ | 0,634 | 9,11 |
| 26 | 93,1 | $1{,}01 \cdot 10^{-3}$ | 138 |
| 29 | 16,4 | $0{,}178 \cdot 10^{-3}$ | 173 |
| 40 | 194 | $2{,}11 \cdot 10^{-3}$ | 123 |
| 47 | 106 | $1{,}15 \cdot 10^{-3}$ | 135 |

Tab. 6: Taux de comptage $R$ ($I$ = 1,00 mA), transmission $T$ et coefficient d'atténuation linéaire $\mu$ en fonction du numéro atomique $Z$ du matériau de l'absorbeur ($U$ = 30 kV, $d$ = 0,05 cm, avec filtre en zircon)

| $Z$ | $\frac{R}{s^{-1}}$ | $T$ | $\frac{\mu}{cm^{-1}}$ |
|---|---|---|---|
| vide | $35{,}9 \cdot 10^3$ | 1,000 | 0 |
| 6 | $34{,}9 \cdot 10^3$ | 0,972 | 0,568 |
| 13 | $20{,}3 \cdot 10^3$ | 0,565 | 11,4 |
| 26 | 29,0 | $0{,}808 \cdot 10^{-3}$ | 142 |
| 29 | 5,77 | $0{,}161 \cdot 10^{-3}$ | 175 |
| 40 | 114 | $3{,}18 \cdot 10^{-3}$ | 115 |
| 47 | 24,3 | $0{,}677 \cdot 10^{-3}$ | 146 |

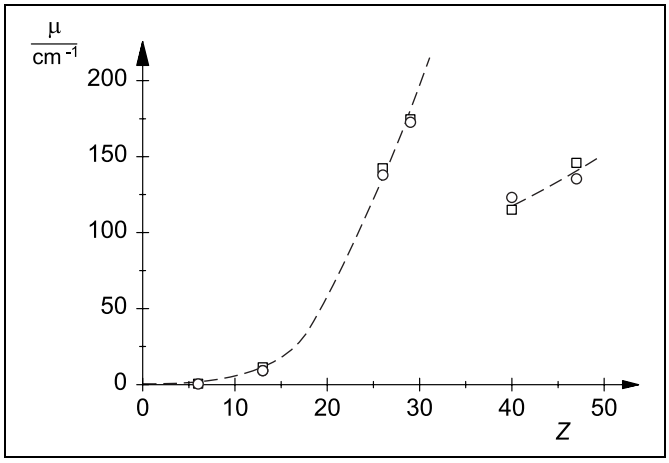



Fig. 4 Coefficient d'atténuation linéaire $\mu$ en fonction du numéro atomique $Z$ de l'absorbeur
Cercles: Mesure avec filtre en zircon
Carrés: Mesure sans filtre en zircon


© by Leybold Didactic GmbH
Printed in the Federal Republic of Germany
Technical alterations reserved